

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності \_\_\_\_\_  
(код і назва)

на тему: Ультразвуковий датчик руху \_\_\_\_\_

Виконав: студент 6 курсу, групи ДП – 71 мп  
(шифр групи)

Івасенко Валентин Юрійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., к.ф.-м.н. Заворотний В.Ф. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., доц., к.т.н. Орлов А.Т. \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю.В. \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

## РЕФЕРАТ

Актуальність розробки та вдосконалення детекторів руху в наш час важко переоцінити. Детектори руху знаходять застосування у багатьох галузях, таких як системи охорони та безпеки, охорона здоров'я, промисловість, робототехніка, споживча електроніка та інші. Зі стрімким зростанням автоматизації також зростає попит на подібні системи – все більш популярними стають системи автоматичного освітлення і клімату в офісах і домівках, що дозволяє не тільки підвищити комфорт, а також і зменшити витрати енергії. Автомобілі обладнують системами автоматичного паркування та автопілотом, використовуючи саме сенсори відстані та руху.

Ця робота безпосередньо пов'язана з темами та дослідженнями, що проводяться на нашій кафедрі, використовуючи знання з сенсорики, теорії сигналів, аналогової та цифрової схемотехніки та програмування.

Метою даної роботи є аналіз різних видів детекторів руху та варіантів їх реалізації, та на основі цих досліджень розробити власний детектор руху з бажаними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні задачі:

1. Дослідити різні типи детекторів руху та обрати з них найбільш прадатний для бази розробки власного детектора руху;
2. Дослідити і вивчити принцип роботи обраного типу датчика, який буде лежати в основі майбутнього детектора руху.
3. Підібрати елементну базу, задати бажані характеристики та відповідно до них розробити детектор руху.

Об'єктом дослідження в даній роботі є ультразвуковий детектор руху, що працює на застосуванні ефекту Доплера.

Предметом дослідження є реалізація такого детектора на основі мікроконтролера PSoC з можливістю модифікації такого пристрою відповідно до поставлених цілей і бажаної галузі застосування.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 67 сторінок. Робота містить 15 рисунків, 24 таблиці та 12 найменувань у списку використаних джерел.

## ABSTRACT

The urgency of the development and improvement of motion detectors in our time is difficult to overestimate. Motion Detectors are used in many industries, such as security and safety, healthcare, industry, robotics, consumer electronics, and others. With the rapid growth of automation, the demand for such systems is increasing - automated lighting and climate systems in offices and homes are becoming more and more popular, which not only allows for comfort, but also reduces energy consumption. Vehicles are equipped with automatic parking and autopilot systems, using distance and motion sensors.

This work is directly related to the topics and research carried out in our department, using knowledge of sensors, signal theory, analog and digital circuits and programming.

The purpose of this work is to analyze various types of motion detectors and their implementation options, and also, based on these studies, to develop their own motion detector with desirable characteristics.

To achieve this goal, you must accomplish the following tasks:

1. Explore different types of motion detectors and choose from them the hardest to develop their own motion detector;
2. To study and study the principle of the selected type of sensor, which will be the basis of the future motion detector.
3. To select an element base, to set the desirable characteristics and to develop a motion detector according to them.

The object of research in this paper is an ultrasonic motion detector that works on the application of the Doppler effect.

The subject of the study is the implementation of such a detector based on the PSoC microcontroller with the ability to modify such a device in accordance with the objectives and desired field of application.

The work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of sources used. The total amount of work consists 67 of pages. The work contains pictures, 24 tables and 12 names in the list of sophisticated sources.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1. КЛАСИФІКАЦІЯ ДАТЧИКІВ РУХУ .....	8
1.1 ІНФРАЧЕРВОНІ ДАТЧИКИ РУХУ .....	10
1.2 УЛЬТРАЗВУКОВІ ДАТЧИКИ РУХУ .....	12
1.3 РАДІОХВИЛЬОВІ ДАТЧИКИ РУХУ .....	13
1.4 ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ДАТЧИКИ РУХУ .....	13
1.5 ЗАСТОСУВАННЯ ДАТЧИКІВ РУХУ .....	14
1.6 ЗАХИСТ ВІД ПРОНИКНЕННЯ .....	15
1.7 АВТОМАТИЗАЦІЯ СВІТЛА .....	16
1.8 АВТОМАТИЗАЦІЯ КЛІМАТУ .....	17
Висновки до Розділу 1 .....	18
2. ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ТА ЕФЕКТУ ДОПЛЕРА ДЛЯ ДЕТЕКТУВАННЯ РУХУ .....	19
2.1 Ультразвук та ефект Доплера .....	19
2.2 Доплерівське зміщення .....	25
2.3 Доплерівська геометрія .....	29
2.4 Визначення доплерівського зміщення в сигналі .....	30
Висновки до Розділу 2 .....	31
3 РОЗРОБКА УЛЬТРАЗВУКОГО ДАТЧИКА РУХУ .....	33
3.1 ПРИНЦИП РОБОТИ ДАТЧИКА .....	34
3.2 Блок схема датчика .....	35
3.3 Схема датчика .....	38
3.4 Внутрішня частина мікроконтролера .....	41
3.5 Вбудоване програмне забезпечення датчика .....	44
3.6 Варіанти розробки та альтернативне використання датчика .....	48
ВИСНОВКИ .....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	67

## ВСТУП

Датчики руху мають застосування у різноманітних галузях, таких як побутова електроніка, автомобілебудування, промисловість та охорона здоров'я, аерокосмічні та оборонні засоби. Сегмент побутової електроніки далі підрозділяється на смартфони і планшети, ігрові та розважальні пристрої та електронні пристрої, що носяться. Автомобільний сегмент підрозділяється на систему розгортання повітряної подушки та систему допомоги водіям (паркотроніка, автопілот). Сегмент промислового застосування включає пожежні сигналізації та детектори диму, елементи керування освітленням та обслуговуючу робототехніку. Азіатсько-Тихоокеанський регіон - це найбільш швидкозростаючий ринок споживчої електроніки та, як очікується, він збільшиться з сукупним середньорічним темпом зростання 15,14% з 2015 року по 2020 рік. [1]

Глобальний ріст ринку датчиків руху в першу чергу зумовлений їх впровадженням у багатьох галузях промисловості, зростанням використання смартфонів, планшетів та мобільних пристроїв, інтеграції гіроскопів у мобільні пристрої та галузі інтерактивної ігрової індустрії, що стрімко розвивається. Ще одним важливим фактором, що зумовлює зростання ринку датчиків руху, є зменшення розміру приладів та впровадження технології мікроелектромеханічних систем (MEMS) в індустрію датчиків руху.

## 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ДАТЧИКІВ РУХУ

Детектор руху - це своєрідна система безпеки, яка використовує здатність до чутливості руху у вигляді датчиків для виявлення руху, і це зазвичай викликає сигнал тривоги або іноді активує інший електричний ланцюг. Зазвичай детектори руху використовуються для захисту закритих приміщень, в цьому випадку умови для роботи датчика можуть бути більш контрольованими. Детектори, призначені для використання в будинках для персональної безпеки, зазвичай виявляють рух у невеликому замкнутому просторі. Детектори для складських приміщень великого діапазону можуть спостерігати за ділянками розмірами, що досягають 25 м на 40 м. Детектори руху дуже широко використовуються у місцях, де знаходяться цінні об'єкти, таких як музеї, банки тощо. Таким чином, детектори руху можуть бути спрямовані на виявлення втручання у вразливих зонах (вікна, двері), або виявлення руху безпосередньо в зоні об'єкту, що охороняється (кейс з цінними експонатами), або бути орієнтованими на вузьку область покриття і утворити невидиму захисну завісу, яка буде активувати тривогу навіть при виявленні найменшого наближення чи дотику.

Робота датчика руху заснована на аналізі хвиль різних типів (акустичних, оптичних або радіохвиль), що надходять на датчик з навколишнього середовища. Залежно від типу використовуваної хвилі датчики руху діляться на:

- інфрачервоні;
- фолоелектричні;
- мікрохвильові;



- томографічні;
- ультразвукові.

Системи детекторів руху використовують різні методи для виявлення рухів. Кожен метод має свої переваги та недоліки. Датчики в детекторах руху можна розділити на два основних типи: пасивні та активні. Залежно від того, чи надсилає сенсор сам ці хвилі і аналізує їх після відбиття чи тільки отримує хвилі з навколишнього середовища, датчики діляться на:

- Пасивні датчики - це датчики, які не надсилають сигнали, а просто приймають їх, такі як зміна температури, зміна інтенсивності світла тощо. Більшість інфрачервоних датчиків є пасивними;
- Активні датчики - датчики, які надсилають хвилі енергії та отримують хвилі, відбиті назад від об'єктів. Будь-яка зміна в відображеній хвилі, викликана, наприклад, рухомим об'єктом, реєструється датчиком. Мікрохвильові та ультразвукові детектори є прикладами активних датчиків;
- комбіновані.

Більшість існуючих датчиків руху являє собою комбінацію цих критеріїв, причому датчики одного типу хвиль як правило використовують один механізм їх генерації та обробки. Найбільш поширені:

- пасивні інфрачервоні датчики (PIR), найдоступніші і поширені датчики руху в принципі, інфрачервоні датчики становлять близько 50% застосовуваних сенсорів руху у світі;
- активні ультразвукові, мікрохвильові та томографічні датчики;
- комбіновані фотоелектричний і інфрачервоний датчики.

Кожен механізм має свої похибки, час від часу допускаючи помилкові тривоги. Щоб знизити ймовірність помилкового спрацювання, датчики іноді об'єднують дві технології в одному пристрої (наприклад, інфрачервоний і ультразвуковий методи). Однак, це в свою чергу підвищує уразливість датчика, оскільки він стає менш чутливим і може в результаті не спрацювати, навіть коли повинен.

### 1.1 ІНФРАЧЕРВОНІ ДАТЧИКИ РУХУ

Дія інфрачервоного датчика заснована на аналізі теплового (інфрачервоного) випромінювання. Пасивний інфрачервоний датчик (PIR) при цьому не випускає ніякого випромінювання сам, а лише аналізує вхідні теплові промені.

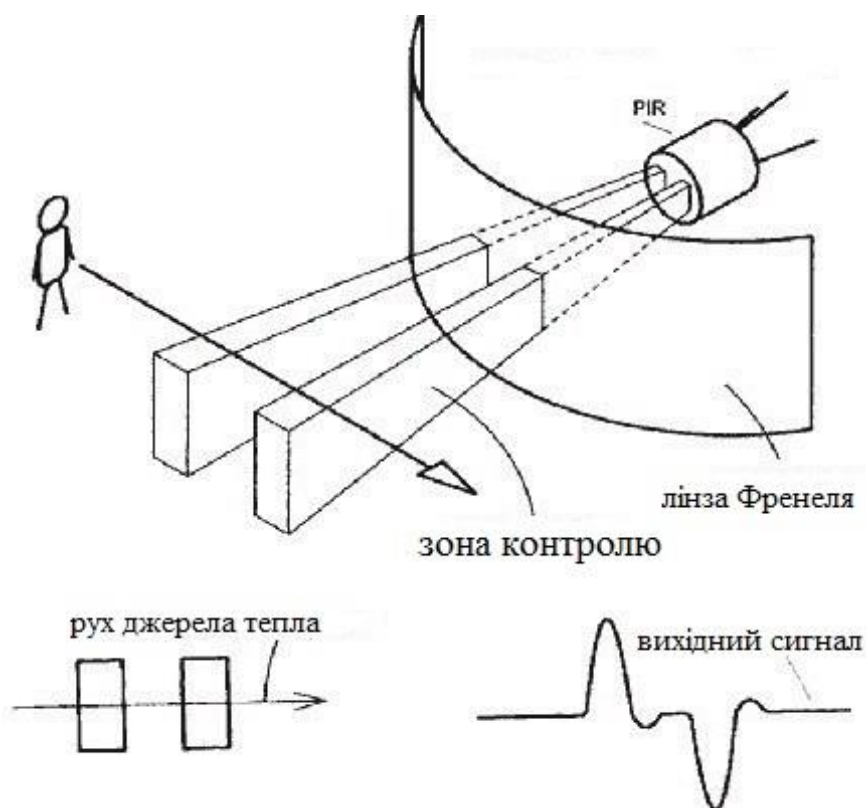


Рис. 1.1 Принцип роботи PIR (passive infrared) датчика руху

Усередині датчика розташовуються два чутливих елемента, які фіксують рівень інфрачервоного випромінювання. Перед кожним встановлена лінза Френеля, яка фокусує на ньому падаючі на датчик інфрачервоні промені. Найпростіший датчик сконструйований так, що навколишній простір "розділений" між двома лінзами, кожна з яких проектує теплове випромінювання зі своєї зони спостереження на "свій" чутливий елемент. У звичайних умовах надходження випромінювання на обидві частини датчика приблизно однакове. Коли з'являється тепловий об'єкт (людина), він спочатку потрапляє в поле зору тільки однієї частини датчика, так що свідчення двох чутливих елементів починають різнитися - і датчик робить висновок, що відбувся рух.

В реальних умовах датчик з двома лінзами був би занадто грубий, тому на практиці в датчиках встановлюють не одну пару лінз, а кілька десятків. Вони легко помітні на поверхні - це чарункова структура напівпрозорого віконця, за яким і розташовуються чутливі елементи. Для економії місця і матеріалів датчик конструюють так, що всі лінзи фокусують вхідне випромінювання тільки на двох чутливих елементах. Таким чином навколишній простір розділено на зони відповідальності між парами лінз, кожна з яких здатна фіксувати рух у своїй зоні.

Як чутливий елемент використовуються в основному піроелектричні елементи, на них припадає лівова частка інфрачервоних датчиків руху. Менш поширені термопари, мікроболометри і напівпровідники: арсенід галію-індію (InGaAs) і теллурид ртуті-кадмію (MCT).

## 1.2 УЛЬТРАЗВУКОВІ ДАТЧИКИ РУХУ

Ультразвуковий датчик заснований на аналізі звукових хвиль за порогом людського сприйняття. Принцип дії датчика базується на ехолокації. Ехолокація - спосіб, за допомогою якого положення об'єкта визначається за часом затримки повернень відбитої хвилі.

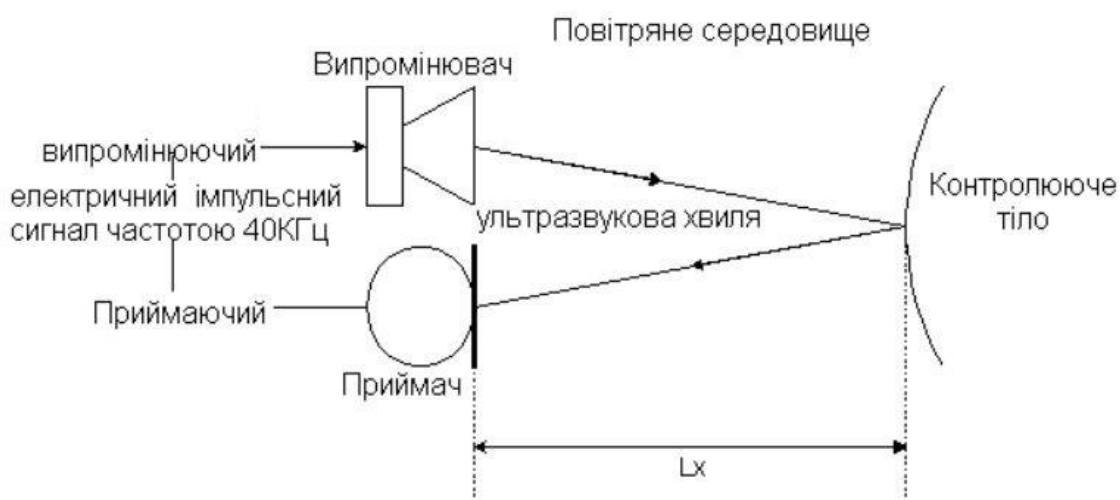


Рис. 1.2 Схема ультразвукової ехолокації

Спеціальний елемент всередині датчика регулярно випускає пучки ультразвукових хвиль. Потім датчик перемикається в режим прийому і очікує повернення відбитих хвиль, після чого аналізує їх. [2]

Якщо стан в зоні покриття датчика залишився незмінним, послані хвилі щораз повертаються відбитими однаково, але якщо починається рух, то хвилі змінюють свої характеристики (ефект Доплера), на підставі чого датчик робить висновок, що стан простору змінився. Коли зміни перевищують встановлений поріг чутливості, датчик спрацьовує.

Як генератор ультразвуку в датчику зазвичай використовується кварцовий або керамічний п'єзоелектричний елемент або спеціальна мембрана, що вібрує під дією електростатичного поля. [2]

### 1.3 РАДІОХВИЛЬОВІ ДАТЧИКИ РУХУ

Томографічні (радіохвильові) і мікрохвильові датчики діють так само, як ультразвукові, але аналізують відображення не акустичних, а радіохвиль.

Оскільки радіохвилі здатні проходити через неметалеві перепони, наприклад, через стіни і дерев'яні меблі, радіохвильові датчики придатні для контролю простору за такими перешкодами. Радіохвильові датчики досить дорогі, і тому їх зазвичай використовують для спостереження за великими комерційними площами, наприклад, за складськими приміщеннями.

### 1.4 ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ДАТЧИКИ РУХУ

Принцип дії фотоелектричного датчика заснований на перевірці переривання пучка світлових променів, при затіненні якого він спрацьовує. Зазвичай цей датчик складається з двох частин, одна з яких випромінює світло, а інша приймає. У приймальній частині знаходиться фотоприймач, в якому під дією падаючого світла виникає електричний струм. Коли світловий пучок перекривається будь-яким тілом, на приймач перестає падати світло і датчик спрацьовує. [3]

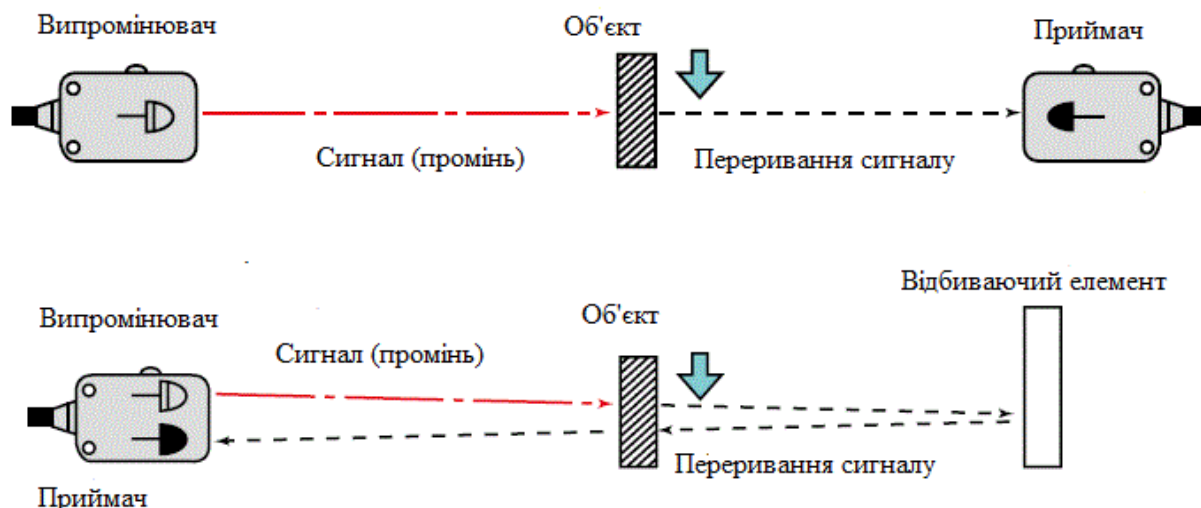


Рис. 1.3 Принцип роботи фотоелектричних датчиків руху

Один з найбільш поширених прикладів використання такого датчика – системи в турнікетах метрополітену, які закриваються перед пасажирами при перетині ними світлового пучка без оплати проїзду.

У фотоелектричних датчиках часто використовують невидиме інфрачервоне випромінювання.

## 1.5 ЗАСТОСУВАННЯ ДАТЧИКІВ РУХУ

Датчики руху і присутності широко застосовуються в повсякденному житті, перш за все в домашньої автоматизації та автоматизації будівель для:

- розпізнавання несанкціонованого проникнення в будинок або офіс;
- автоматизації освітлення;

- автоматизації клімату.

Наприклад, використання датчиків руху і присутності для автоматизації освітлення і кондиціонування дозволяє скоротити споживання енергії на 40%, а витрати на освітлення - на 60% - 70%.

Комерційні застосування датчиків руху включають:

- споживчу електроніку, в тому числі смартфони та планшети, відеоігри і розумні годинники;
- автомобілебудування, включаючи подушки безпеки, парктроніка і безпілотні автомобілі;
- охорону здоров'я;
- оборонну промисловість і авіабудування.

## 1.6 ЗАХИСТ ВІД ПРОНИКНЕННЯ

При фіксації проникнення сторонніх осіб в приміщення датчик активує сирену. Встановлений в складі системи пультової охорони датчик також відправляє сигнал тривоги в диспетчерський центр охоронної організації, яка при необхідності висилає на місце групу реагування.

Крім того, в разі тривоги датчик може запустити відправку повідомлення власникові: SMS, Email або push-повідомлення в залежності від налаштувань. Деякі системи пропонують також функцію автоматичного телефонного дзвінка власнику або вказаним ним довіреним людям.

Датчик також може активувати відеоспостереження, а в самотійно встановленій системі також запустити будь-яку іншу функцію на розсуд

власника: заблокувати замки до приїзду правоохоронців, знеструмити техніку, відключити освітлення і так далі.

## 1.7 АВТОМАТИЗАЦІЯ СВІТЛА

Залежно від того, фіксує він рух в приміщенні чи ні, датчик руху або присутності може автоматично включати або вимикати освітлення та змінювати його яскравість, одразу або з затримкою.

У загальному випадку датчик через контролер передає відповідні команди на вимикач (формально датчик лише повідомляє контролеру про те, що в приміщенні є рух чи немає, а вже контролер відповідно до залишеними власником інструкціями віддає потрібні команди вимикачів). Однак поширені і вимикачі з вбудованими датчиками руху, як правило вони використовуються в громадських і комерційних просторах: офісах, складах, під'їздах.

Замість вимикача може використовуватися будь-який інший контролер освітлення, наприклад RGB-контролер для управління світлодіодною стрічкою або розумна лампа.

Основною перевагою системи управління освітленням над автономним управлінням освітлення або над звичайним ручним перемиканням світла є здатність контролювати окремі світлові прилади або групи приладів з Єдиного призначеного для користувача інтерфейсу пристрою.



Можливість одночасно контролювати кілька джерел світла з одного пристрою дозволяє створити потрібну світлову атмосферу, в залежності від призначення приміщення в той чи інший період часу.

Одним з найважливіших переваг системи управління освітленням є зниження енергоспоживання. Ще одна перевага - це збільшення тривалості терміну служби електричних ламп, за рахунок енергозбереження.

Бездротові системи управління освітленням також дозволяють знизити витрати на установку і припускають більше варіантів розміщення датчиків і вимикачів.

## 1.8 АВТОМАТИЗАЦІЯ КЛІМАТУ

При спрацюванні датчик здатний автоматично змінити потужність кліматичних систем відповідно до інструкцій, зазначених власником. Для цього він повідомляє контролер про те, що зафіксував рух або його відсутність, а контролер пускає в хід потрібні алгоритми, командуючи кліматичним пристроям включитися, відключитися або змінити параметри роботи.

Наприклад, якщо взимку датчик виявляє присутність людей в приміщенні, контролер передає встановленому на батарею терморегулятора або регулятору теплої підлоги команду підвищити температуру. Якщо влітку датчик зафіксував відсутність людей, контролер командує кондиціонеру знизити потужність. Це дозволяє значно знизити використання електроенергії.

## Висновки до Розділу 1

На даний момент існує багато видів детекторів руху, найбільш поширеними з яких є інфрачервоні, ультразвукові та фотоелектричні детектори. Такі пристрої мають дуже широке використання у багатьох галузях, таких як оборонна промисловість, охорона здоров'я, споживча електроніка, автоматизація, системи безпеки та безліч інших. Відповідно до вимог та умов використання застосовуються ти чи інші принципи роботи, або навіть їх комбінації. Кожен з розглянутих видів детекторів руху має свої певні переваги і недоліки, аналізуючи які можна підібрати найоптимальніший варіант реалізації пристрою відповідно до поставлених цілей.

Напрямок у якому зростає ринок споживчої електроніки є дуже сприятливим для розвитку систем детектування руху. Так, детектори руху застосовуються в системах охорони, смартфонах, системах «розумного дому» (автоматизація світла, клімату), системах автоматичного паркування та безпілотного керування авто, розумних годинниках, іграшках тощо.

Після проведення огляду різноманітних типів сенсорів, їх принципів роботи, представлення на ринку та галузей застосування, було зроблено вибір у цій роботі більш детально розглянути саме ультразвукові детектори руху та провести дослідження і розробити власний пристрій з заданими параметрами.

## 2. ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ТА ЕФЕКТУ ДОПЛЕРА ДЛЯ ДЕТЕКТУВАННЯ РУХУ

### 2.1 Ультразвук та ефект Доплера

Ультразвук - це звукові хвилі з частотами, які перевищують верхню чутливу межу слуху людей. Ультразвук не відрізняється від "нормального" (чутного для людини) звуку за своїми фізичними властивостями, за винятком того, що люди не можуть чути його. Ця межа варіюється для кожної індивідуальної особи і становить приблизно 20 кГц у здорових молодих людей. Ультразвукові пристрої працюють з частотами від 20 кГц до декількох гігагерців.

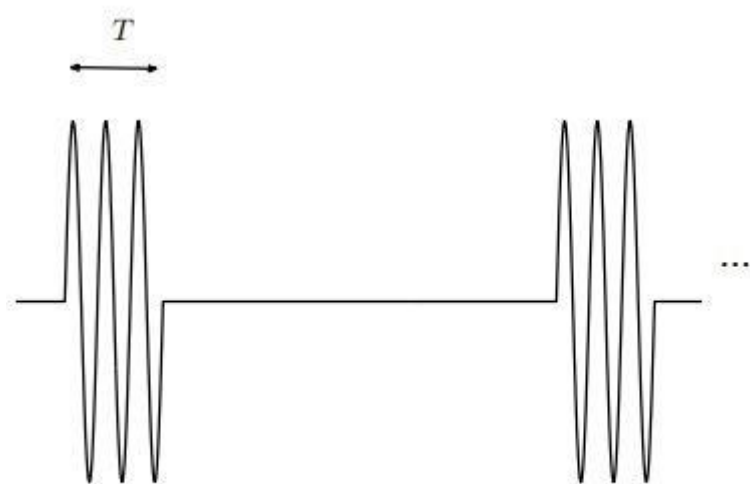


Рис. 2.1 Імпульс ультразвуку

Ультразвук використовується у багатьох різних областях. Ультразвукові пристрої використовуються для виявлення об'єктів та вимірювання відстаней. Ультразвукове зображення або сонографія часто використовується в медицині. При неруйнівному контролі продуктів та конструкцій ультразвук використовується для виявлення невидимих вад. Промислово, ультразвук використовується для очищення, змішування та прискорення хімічних процесів. Тварини, такі як кажани та морські свинки, використовують ультразвук для виявлення здобичі та перешкод. Вчені також вивчають ультразвук, використовуючи графенові діафрагми як спосіб зв'язку.

Верхня частота у людини (приблизно 20 кГц) обумовлена обмеженнями внутрішнього вуха. Сухове відчуття може виникнути, якщо ультразвук високої інтенсивності подають безпосередньо в череп людини і доходить до вушного лабіринту через провідність кістки, не проходячи через внутрішнє вухо.

Ультразвукові системи рівня або детектори не потребують контакту з ціллю. Для багатьох процесів в медичній, фармацевтичній, військовій та загальних галузях промисловості це є перевагою перед вбудованими датчиками, які можуть забруднювати рідини всередині ємності або трубки або які можуть самі бути пошкоджені чи забруднені продуктом.

Використовуються як системи, що подають безперервні хвилі, так і імпульсні системи. Принцип роботи імпульсно-ультразвукової технології полягає в тому, що сигнал передачі складається з коротких спалахів ультразвукової енергії. Після кожної подачі імпульсу датчик отримує відбитий сигнал впродовж невеликого часового проміжку, що відповідає часу, протягом якого енергія проходить через середовище. Тільки сигнал, отриманий у цьому вікні, буде кваліфікований для додаткової обробки сигналу.

Популярним серед споживачів застосуванням ультразвукового виміру відстані була камера Polaroid SX-70, яка включала в себе легку систему із ультразвукових перетворювачів, яка автоматично фокусує камеру. Пізніше компанія Polaroid ліцензувала цю технологію застосування ультразвуку, і вона стала основою для ряду ультразвукових приладів.

Широке застосування ультразвуку - це система автоматичного відчинення дверей, де ультразвуковий датчик виявляє наближення людини і відчиняє двері. Ультразвукові датчики також використовуються для виявлення вторгнень; ультразвукові детектори руху можуть охоплювати широку область спостерігаючи з однієї точки.

Ще одне поширене використання ультразвукових досліджень - це вимірювання відстані або глибини за допомогою ехолокації; такі пристрої також називаються сонарами або далекомірами. Ультразвуковий імпульс генерується у певному напрямку. Якщо на шляху цього імпульсу є об'єкт (або дно у випадку вимірювання глибини), частина імпульсу або весь імпульс буде відбиватися назад до передавача як ехо і потім надходить до приймача. Вимірюючи різницю часу між переданим імпульсом та отриманим ехо, можна визначити відстань або глибину.

Незважаючи на те, що знаходження глибини під водою виконується на великих відстанях (від одного до декількох кілометрів) як в чутному діапазоні, так і на частотах поза межами чутного діапазону, ультразвуковий діапазон хвиль використовується для більш коротких відстаней і коли бажано мати більш високу точність вимірювання відстані. Вимірний час проходження імпульсів сонара у воді сильно залежить від температури і солоності води. Ультразвукові вимірювання можуть бути обмежені через бар'єрні шари з великими показниками солоності, температури або вихрові потоками водних мас. Вимірювання

відстаней у воді проводиться від приблизно сотень до тисяч метрів, але точність вимірювань может досягати сантиметрів.

Ультразвукова ехолокація також застосовується для вимірювання відстані в повітряному середовищі та на відносно коротких відстанях. Наприклад, ручний ультразвуковий вимірювальний інструмент (далекомір) дозволяє швидко і легко вимірювати периметр приміщення. Принцип роботи таких пристроїв є дуже схожим до ультразвукових детекторів руху.

Людина, тварина або рухомий об'єкт створюють звук у результаті фізичного руху. Утворений звук залежить від характеру руху, який може бути повільним чи різьким, а також може залежати від середовища. Однак ці рухи можуть бути виявлені за допомогою ультразвукового датчика.

Ультразвукові датчики руху випромінюють енергію ультразвуку в зону контролю (контрольовану область) і потім реагують на зміну структури відображеної енергії. Більшість таких приладів використовують методику, яка базується на дослідженні зміни частоти відбитої енергії для виявлення руху або зміни положення об'єктів. Переданий випромінювачем ультразвуковий сигнал поширюється у повітрі у вигляді хвилі. Ця хвиля відбивається назад від навколишнього середовища в приміщенні і пристрій реєструє характеристику контрольованої області. Пристрої з таким принципом роботи можуть детектувати рух будь-яких або певних об'єктів, можуть бути досить недорогими, портативними, а також можуть використовуватися для активації іншого ланцюга, будь то його включення або виключення в залежності від під'єднаної до датчика схеми. Найбільш широко такі датчики застосовуються для виявлення руху або переміщення об'єктів в замкнутому просторі (приміщенні). Ультразвукові датчики функціонують за допомогою перетворювачів, які генерують сигнали на частоті 20-60 кГц, а коли сигнал відбивається від

будь-якого рухомого об'єкта в зоні спостереження, то активується наступний ланцюг (наприклад, сигнал тривоги). Такі системи розробляються відповідно до певних потреб і можуть мати різні характеристики, такі як робоча частота сигналу, ефективна площа зони спостереження, споживання енергії, час реакції тощо.

В даний час існує безліч комерційних ультразвукових детекторів руху, в основному основною метою цієї роботи є проектування та побудова простий і дешевої системи детектора ультразвукового руху, яка спрямована на виявлення фізичного руху людини, тварини чи будь-якого об'єкта, що рухається. Конструкція полягає у покращенні використання датчика при детектуванні руху. В цілому, він спрямований на зменшення вартості проектування, розробки або побудови ультразвукового детектора руху.

Існує безліч детекторів руху, але у цій роботі надано особливу увагу саме ультразвуковим детекторам руху через свої численні переваги над іншими типами детекторів. Наприклад, ультразвукові детектори мають швидкий час відгуку та дуже високу чутливість, такі детектори не вимагають фізичного контакту з досліджуваними об'єктами, є екологічно чистим та надійним, і, насамперед, використовують ультразвукові хвилі, які не є видимими та чутними для людини. Коли приймач отримує ультразвукові хвилі відбиті від контрольованої області, він надсилає інформацію про параметри відбитих хвиль до відповідної схеми для обробки та подальших дій (як правило, аудіоконтур). У випадку руху людини або іншого об'єкта в просторі між приймачем і передавачем ми можемо спостерігати зміни характеристик відбитої хвилі, такі як амплітуда, частота або фаза. Детектор руху спостерігає за цими параметрами на заздалегідь визначеній певній досліджуваній частоті і виявляє будь-які зміни для детектування руху. Незначна зміна параметрів,

яка, наприклад, може бути викликана вітром, комахами, колиханням фіранок тощо, ігнорується і не активує детектор. Коли спостерігається помітна зміна, наприклад викликана рухом людини, пристрій активується і, наприклад, запускає сигнал тривоги.

Ультразвукові детектори руху найчастіше використовують явище, відоме як ефект Доплера при виявленні руху об'єкта. Ефект Доплера — явище зміни частоти хвилі, яку реєструє приймач, викликане переміщенням джерела або приймача. Ефект названий на честь австрійського фізика Крістіана Доплера. Виходячи з власних спостережень за хвилями на воді, Доплер припустив, що подібні явища відбуваються в повітрі з іншими хвилями. На підставі хвильової теорії він в 1842 році вивів, що наближення джерела світла до спостерігача збільшує спостережувану частоту, віддалення зменшує її. Доплер теоретично обґрунтував залежність частоти звукових і світлових коливань, що сприймаються спостерігачем, від швидкості і напрямку руху джерела хвиль і спостерігача відносно один одного.

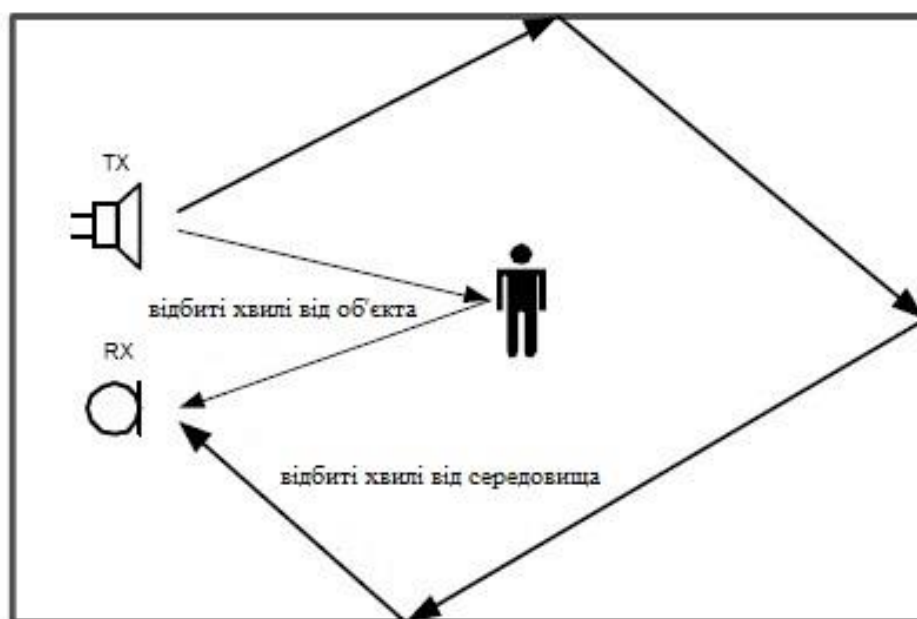




Рис. 2.2 Основний принцип роботи ультразвукового датчика

Доплер використав цей принцип в астрономії і провів паралель між акустичним і оптичним явищами. Він вважав, що всі зірки випромінюють біле світло, однак колір змінюється через їх рух до або від Землі (цей ефект, для розглянутих Доплером подвійних зірок, дуже малий). Хоча зміни в кольорі неможливо було спостерігати з обладнанням того часу, теорія про звук була перевірена вже в 1845 році. Тільки відкриття спектрального аналізу дало можливість експериментальної перевірки ефекту в оптиці. Прикладом доплерівського ефекту в акустиці можна вважати сприйняття людиною звуку в залежності від її наближення до джерела звуку. Знаходячись близько до, припустимо, горну, людина буде сприймати тональність звуку вище і тональність буде ставати нижчою при віддалені людини від горну.

Отже, рух об'єкту в зоні спостереження змінює частоту відбитої хвилі і дозволяє таким чином реєструвати цей рух ультразвуковими датчиками.

## 2.2 Доплерівське зміщення

Розглянемо зв'язок між частотою ультразвукової хвилі, яка випромінюється джерелом, що рухається зі швидкістю  $V$ , і частотою хвилі, що надходить до приймача, який рухається зі швидкістю  $V_r$ . Для спрощення припустимо, що як джерело, так і приймач рухаються по

прямій траєкторії в одному напрямку. У час  $t = 0$  джерело S та приймач R знаходяться на відстані  $d$  (рис. 2.3).

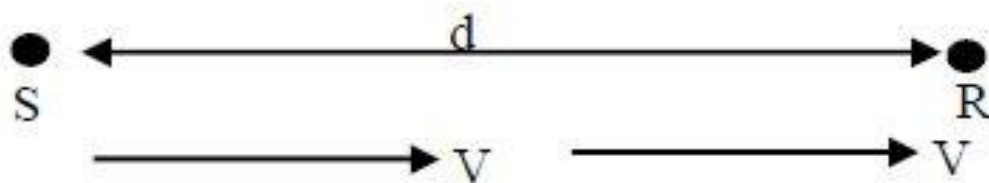


Рис 2.3 Положення джерела (S) та приймача (R) в момент часу  $t=0$

Джерело випромінює хвилю, яка поширюється зі швидкістю  $c$ , і досягає приймача після часу  $t$ , коли приймач змістився на  $V_r \cdot t$  метри (рис 2.4).

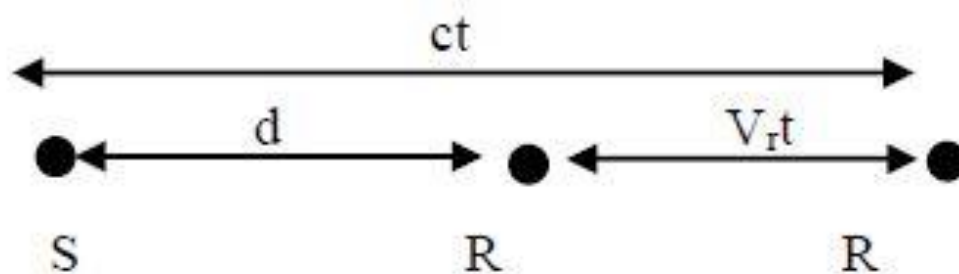


Рис 2.4 Положення джерела (S) та приймача (R) в момент часу  $t$

Відповідно відстань пройдена хвилею від джерела до приймача буде:

$$ct = d + V_r t \quad (2.1)$$

а час, відповідно

$$t = \frac{d}{c - V_r} \quad (2.2)$$

У момент  $t$  джерело (S) змістилося на  $V_s \cdot t$  метрів. Нехай хвиля, що випромінюється в той момент, приймається приймачем (R) у час  $t'$ , в цей час приймач виконає переміщення на відстань  $V_r \cdot t'$  (рис 2.5).

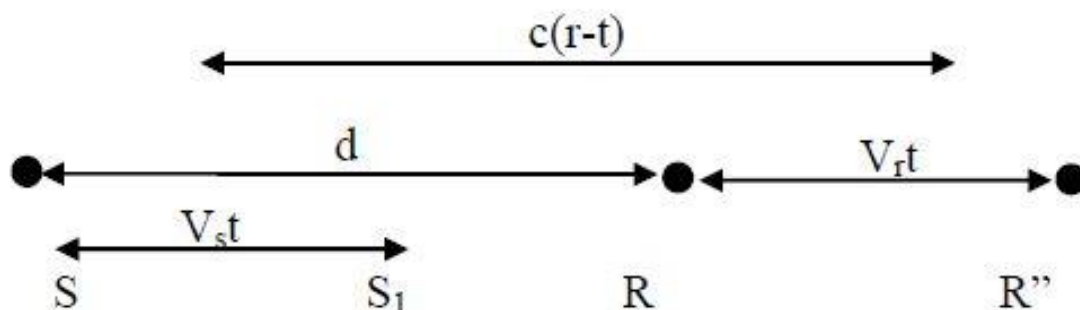


Рис. 2.5 Зміщення відносно джерела та приймача

Пройдена відстань у такому випадку буде дорівнювати:

$$c(t' - t) = (d - V_s \tau) + V_r t' \quad (2.3)$$

Звідси, для приймача цей час дорівнює:

$$t' = \frac{d + (c - V_r) \tau}{c - V_r} \quad (2.4)$$

Таким чином, для приймача інтервал між хвилями дорівнює:

$$\tau' = t' - t = \frac{(c - V_r)}{c - V_r} \tau \quad (2.5)$$

Тоді як для джерела інтервал між хвилями був  $\tau$ .

Кількість хвиль, що випромінюються джерелом за час  $\tau$ , повинна бути рівною кількості хвиль, отриманих приймачем за проміжок часу  $\tau'$ :

$$f_r \tau' = f_s \tau \quad (2.6)$$

Де  $f_r$  та  $f_s$  - це частоти приймача та джерела відповідно.

Звідси та з 2.5 можна виразити:

$$f_r = \frac{c - V_r}{c - V_s} f_s \quad (2.7)$$

для  $V_s$  та  $V_r \ll c$  маємо:

$$f_r = \frac{1 - \frac{V_r}{c}}{1 - \frac{V_s}{c}} f_s = \left[ 1 - \frac{V_r}{c} \right] \left[ 1 - \frac{V_s}{c} \right]^{-1} \quad (2.8)$$

Розкладемо 2.8 в біноміальний ряд

$$(1 + x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!} x^2 + \dots$$

для  $x \ll 1$  членами вищого порядку можна знехтувати, отже отримаємо:

$$f_r \approx \left[ 1 - \frac{V_r}{c} \right] \left[ 1 - \frac{V_s}{c} \right] = \left( 1 - \frac{V_{rs}}{c} \right) f_s \quad (2.9)$$

де  $V_{rs}$  - це швидкість приймача відносно джерела.

$$V_{rs} = V_r - V_s \quad (2.10)$$

Таким чином, доплерівська частота (зсув)  $f_d$  дорівнює:

$$f_d = f_r - f_s = \frac{-V_{rs}}{c} f_s \quad (2.11)$$

Отже частота на відстані від джерела буде меншою, ніж частота, виміряна на джерелі, тоді як частота, виміряна приймачем, що рухається у бік джерела, буде більшою, ніж частота, виміряна джерелом.

## 2.3 Доплерівська геометрія

У більшості доплерівських датчиків випромінювач ультразвукових хвиль і приймач є стаціонарними і ведуть спостереження за рухомим об'єктом. Представимо рухомий об'єкт мішенню, яка опромінюється ультразвуковими хвлями передавачем датчика руху.

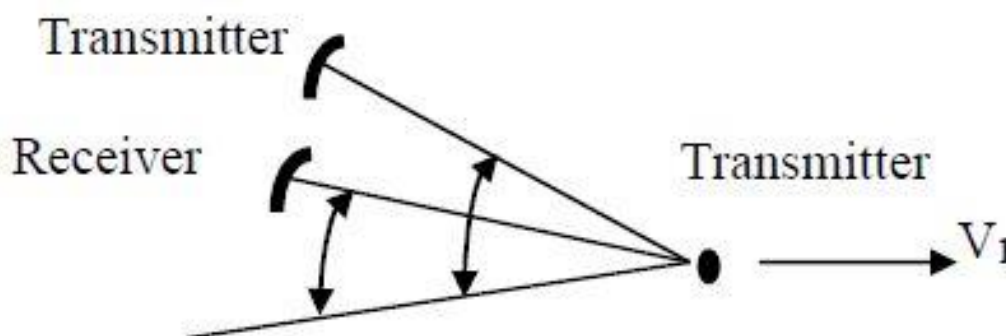


Рис. 2.6 Типове розташування ультразвукових датчиків

Швидкість мішені відносно передавача буде  $V \cos \theta_t$ , і швидкість мішені відносно приймача буде  $V \cos \theta_r$ . Доплерівське зміщення, що виникає внаслідок цього руху, може бути розраховане, якщо:

1. Мішенню є приймач, що віддаляється від джерела з швидкістю  $V \cos \theta_t$ ;
2. Приймач віддаляється від мішені (джерела) зі швидкістю  $V \cos \theta_r$ .

Це еквівалентно тому, що приймач віддаляється від джерела зі швидкістю  $V \cos \theta_t + V \cos \theta_r$ , хоча вони обидва нерухомі.

У випадку руху мішені на малих швидкостях ( $V \ll c$ ) доплерівська частота для відокремлених датчиків може бути представлена як:

$$f_d = -\frac{f_s V}{c} (\cos \theta_t + \cos \theta_r) \quad (2.12)$$

$$f_d = -\frac{2f_s V}{c} \cos\left(\frac{\theta_r + \theta_t}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_r - \theta_t}{2}\right) \quad (2.13)$$

Якщо мішень рухається на великих швидкостях ( $V \sim c$ ), то неможливо наблизити електромагнітне випромінювання, і для відокремлених датчиків повинна бути використана ціла формула.

$$f_d = \frac{c - V \cos \theta_r}{c + \cos \theta_d} f_s \quad (2.14)$$

І частота Доплера відповідно становить

$$f_d = f_r - f_s \quad (2.15)$$

Де  $f_d$  - частота (зміщення) Доплера,  $f_r$  - частота приймача,  $f_s$  - частота джерела.

## 2.4 Визначення доплерівського зміщення в сигналі

Переданий сигнал має форму  $x_r(t) = \xi_t \cos(\omega_s t)$ .

Відповідний отриманий сигналу від однієї цілі буде:

$$x_r(t) = \xi_r \cos((\omega_s + \omega_d)t + \theta) \quad (2.16)$$

де  $\theta$  - фазовий член залежить від відстані до цілі (рад),  $\omega_s = 2\pi f_s$  - циклічна частота джерела і  $\omega_d = 2\pi f_d$  - циклічна доплерівська частота.

Два сигнали змішуються і тоді отримуємо:

$$x_1(t)x_s(t) = \xi_t \xi_s \cos(\omega_s t) \cos([\omega_s + \omega_d]t + \theta) \quad (2.17)$$

Виконаємо просте перетворення і отримаємо:

$$x_1(t)x_s(t) = \frac{\xi_r \xi_s}{2} (\cos(\omega_d t + \theta) + \cos 2([\omega_s + \omega_d]t + \theta)) \quad (2.18)$$

Далі сигнал слід пропустити через фільтр низьких частот, щоб вилучити складові  $2f_s$ , залишивши тільки сигнал Доплера:

$$x_d(t) = \frac{\xi_r \xi_t}{2} (\cos(\omega_d t + \theta)) \quad (2.19)$$

Амплітуда відбитих від нерухомих об'єктів хвиль на 40дБ-50дБ більшою, ніж амплітуда сигналу Доплера, і тому для їх вилучення часто потрібна додаткова фільтрація високих частот.

## Висновки до Розділу 2

У цьому розділі було докладно розглянуто принцип роботи ультразвукових детекторів руху. Найбільш ефективним методом виявлення рухомих об'єктів є застосування ефекту Доплера, на чому і базуються переважна більшість ультразвукових детекторів руху. Присутність рухомого об'єкта у зоні спостереження змінює частоту

відбитих ультразвукових хвиль, які реєструються приймачем і вже подальша обробка цього сигналу може активувати наступний електричний ланцюг. Таким ланцюгом, наприклад, може бути сигнал тривоги чи звичайний вимикач.

Для підвищення чутливості і водночас зменшення частоти хибних спрацювань датчика використовується фільтрація сигналу, яка дозволяє виділити доплерівське зміщення саме у досліджуваному діапазоні частот.

Застосування ультразвуку та ефекту Доплера є добре вивченим явищем в електроніці, що значно спрощує досягнення поставлених задач і дає можливість для розробки досить простих та надійних пристроїв, в тому числі і детекторів руху.



### 3 РОЗРОБКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА РУХУ

Під час проходження практики та проведення аналізу різних видів датчиків руху, їх особливостей та сфер застосування, було прийнято рішення розробити власний ультразвуковий датчик руху, принцип дії якого засновано на ефекті Доплера. Основна галузь застосування такого датчика - системи безпеки, але також він може застосовуватися в інтелектуальних іграшках та техніці, системах автоматичного освітлення, контролю клімату, відкривання дверей та для безконтактного вимірювання швидкості.

Ультразвукові датчики руху характеризуються малим споживанням енергії, невисокою ціною і високою чутливістю. Саме тому такі датчики часто використовуються в домівках, офісах та системах автомобільної охорони. Існуючі ультразвукові датчики мають безліч пасивних та активних компонентів і є відносно складними для виготовлення та тестування. У більшості випадків такі датчики повинні пройти трудомісткий процес налаштування. Запропонований датчик використовує один PSoC мікроконтролер разом з декількома пасивними компонентами. Він характеризується високою чутливістю та стійкістю до різноманітних сигналів шуму.

### 3.1 ПРИНЦИП РОБОТИ ДАТЧИКА

Будь який об'єкт, що рухається в зоні спостереження, змінює амплітуду та фазу відбитого ультразвукового сигналу, який змінює сумарну амплітуду сигналу на приймачі. [2]

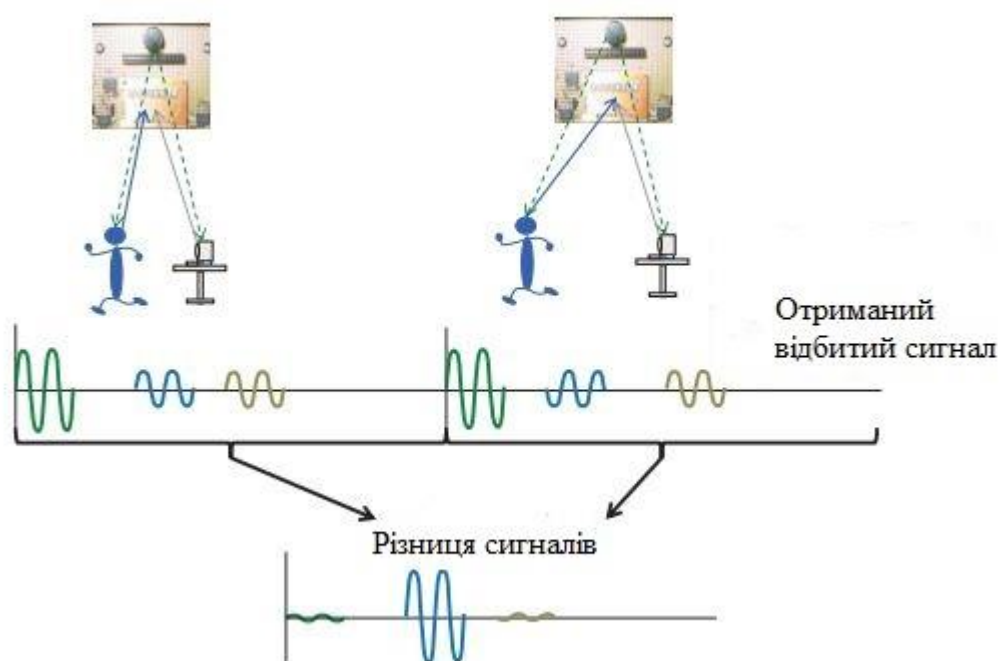


Рис. 3.1 Зображення дослідження відбитих хвиль для виявлення руху

Більшість дешевих датчиків виконують аналіз амплітуди відбитого сигналу. Через просту реалізацію, такий метод детектування характеризується високою чутливістю до шумів. Наприклад, неоднорідні повітряні потоки, вібрації датчика, деформації кімнатних вікон та дверей, пориви вітру можуть змінити інтерференційну картину та сгенерувати сигнал хибної тривоги.

Кращий показник стійкості до шумів можна отримати якщо приймаючий датчик буде аналізувати частоту відбитого сигналу замість його амплітуди. Спектр відбитого сигналу емулює ефект Доплера. [4]

Таблиця 3.1 Основні характеристики датчика

Діапазон функціонування	5 см- 4 м
Робоча частота	40 кГц
Споживання енергії	27 мА (тривога вимкнена) 55 мА (тривога вимкнена)
Час реакції	0,25 мс

### 3.2 Блок схема датчика

Блок-схема датчика зображена на рис. 3.2. Сірі блоки використовуються для зображення зовнішніх модулів по відношенню до PSoC мікроконтролера.

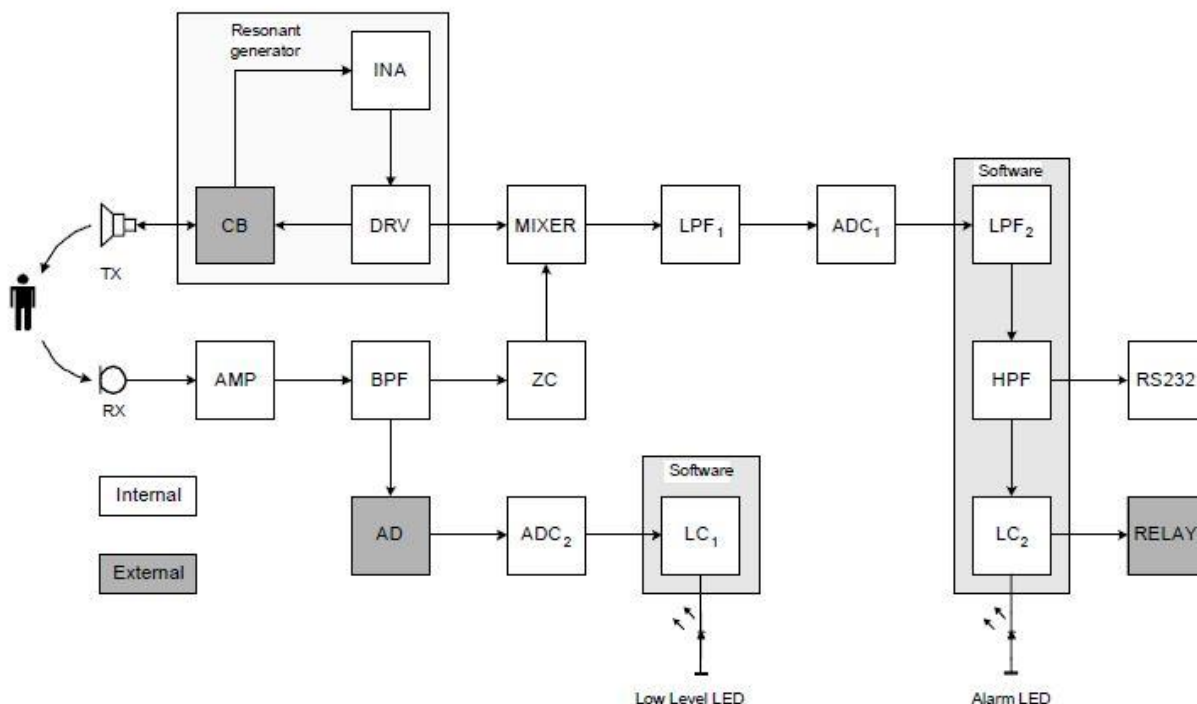


Рис. 3.2 Блок-схема датчика

Резонансний генератор управляє пьезоелектричним передавачем TX, який перетворює електричні сигнали в акустичні хвилі. Хвилі, відбиті від різноманітних об'єктів досягаючи приймача RX, перетворюються в електричні сигнали та підсилюються підсилювачем AMP. Резонансний смуговий фільтр BPF (band-pass filter) пригнічує шум, який знаходиться поза межами області частот, що перевіряються, і виключає постійну складову з виходу підсилювача. Як було розглянуто вище, відбитий сигнал може бути змодульований за амплітудою. Детектор переходу через нуль ZC (zero-crossing detector) пригнічує цю небажану амплітудну модуляцію і перетворює вихідний сигнал фільтра в модульований за фазою сигнал. Варто уваги те, що у випадку коли амплітуда сигналу, відбитого від рухомого об'єкта менша ніж амплітуда сигналу відбитого від нерухомих об'єктів, вихідний сигнал смугового фільтра буде модульований за фазою. В іншому випадку він буде модульований за частотою. В системах безпеки

сигнал, відбитий від рухомих об'єктів може бути від 3 до 20 разів слабшим, ніж сигнал відбитий від нерухомих об'єктів.

Виход детектора переходу через нуль ZC під'єднано на вхід блоку MIXER. Вихідний сигнал ультразвукового генератора використовується як опорний сигнал для MIXER. Низькочастотний фільтр LPF1 (low-pass filter) вибирає доплерівський сигнал з вихідного сигналу блока MIXER. Вихідний сигнал фільтра потім оцифровується сігма-дельта аналогово-цифровим перетворювачем ADC1 для подальшої програмної обробки. Програмно реалізований цифровий фільтр низьких частот LPF2 додатково пригнічує високочастотні компоненти в частотному спектрі Доплерівського сигналу та усуває вплив фазового шуму детектора переходу через нуль. Цифровий високочастотний фільтр HPF (high-pass filter) обмежує нижню частоту в доплерівському спектрі. Це ефективно пригнічує вплив низькочастотного шуму на роботу датчика. Вихідний сигнал високочастотного фільтра аналізується компаратором LC2 для генерації сигналу тривоги. Для інших сфер застосування датчика або для його тестування, відфільтрований потік даних може бути переданий через RS232 сумісний передавач.

Для надійного детектування об'єктів, що рухаються, рівень сигналу відбитих хвиль повинен бути більше певного значення. Якщо ця умова не виконується, датчик потрібно помістити в інше місце або потрібно підвищити вихідну потужність передатчика. Підсистема контролю рівня вхідного сигналу складається з амплітудного детектора AD, сумуючого аналого-цифрового перетворювача ADC2 та компаратора LC1.

П'єзоелектричні датчики характеризуються високим Q фактором та потребують точного налаштування робочої частоти для досягнення максимальної ефективності. Поміж тим, резонансна частота датчика залежить від температури і схильна до впливу старіння. Саме через те, в

більшості сучасних ультразвукових датчиків використовуються дорогі схеми компенсації температури та частоти. Крім того, п'єзоелектричні датчики потребують відносно великих вхідних напруг для отримання акустичного сигналу потрібної потужності. Ці труднощі можна подолати якщо резонансний генератор використовується в зв'язці з п'єзоелектричним передатчиком для збудження мостового драйверу навантаження. Якщо такий же датчик використовується в приймаючій частині, то температурний ефект та ефект старіння практично усувається.

Запропонований датчик включає в себе резонансний генератор з мостовим передавачем для отримання максимальної вихідної потужності для даного джерела живлення. Цей генератор складається з п'єзоелектричного драйвера DRV та струмового мосту CB, для вимірювання тока кристалу, і підсилювача INA.

### 3.3 Схема датчика

Спочатку буде представлено аналіз детальної схеми, а потім буде розглянуто можливі удосконалення та варіанти реалізації.

Повна схема датчика представлена на рис. 3.3.

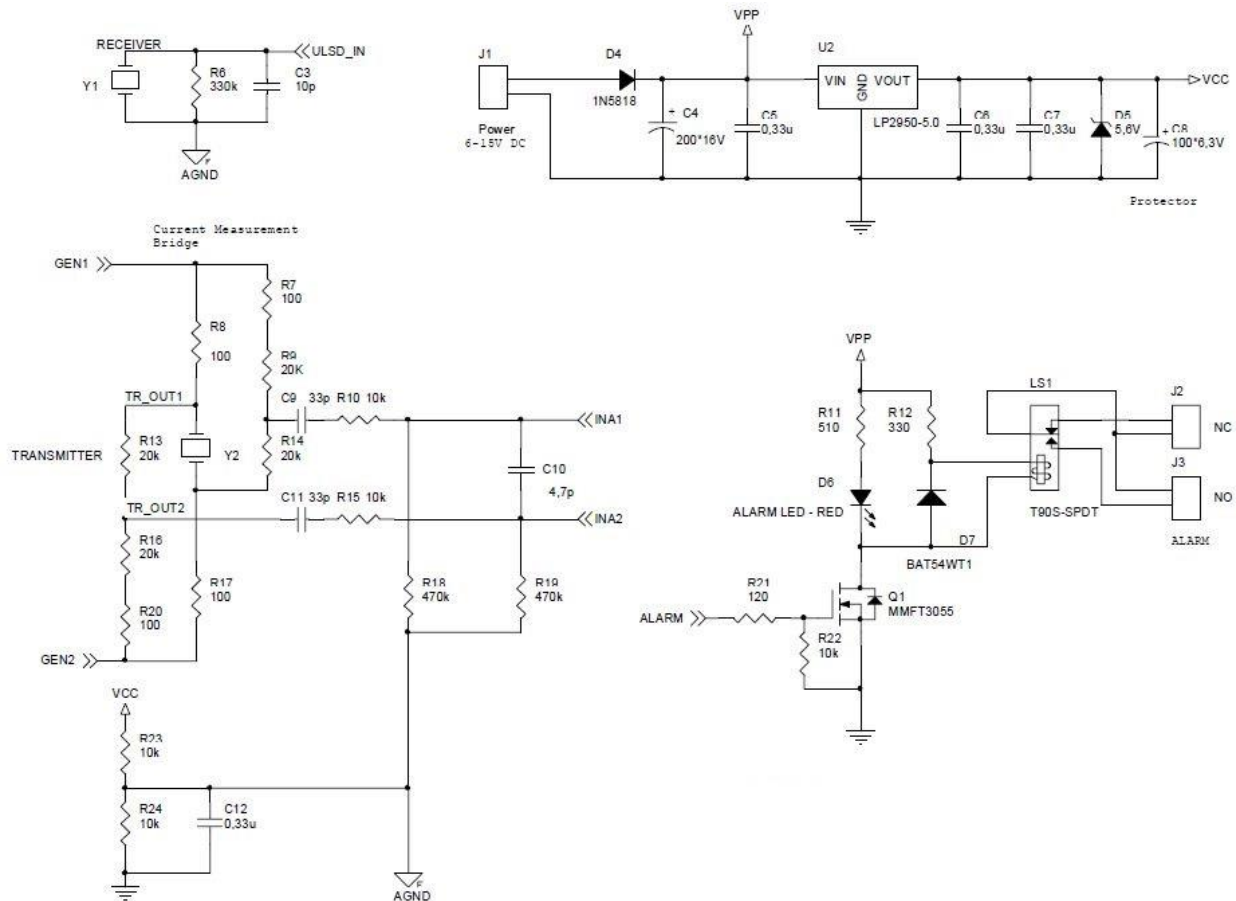


Рис. 3.3 Схема датчика; аналогові компоненти

Струмовий міст передавача формується резисторами R7-R9, R13-R14, R16-R17 і R20. Якщо  $R8+R13=R16+R20$  та  $R7+R9=R14+R17$ , то напруга між лівими контактами C9 та C11 прямопропорційна струму в п'єзoeлектричному передавачі Y2. Диференційні ланцюги C9R10R18 та C11R15R19 компенсують фазовий зсув в внутрішньому PSoC MCU інструментальному підсилювачі та забезпечують частоту коливань дуже близьку до основної резонансної частоти кварцу. Параметри ланцюга є оптимальними для частоти коливань 30-40 кГц і можуть бути скореговані для інших резонансних частот кварцу. Вхідний каскад датчика складається з R6C3, таким чином R23R24C12 визначають аналоговий потенціал землі. Реле сигналу тривоги керується блоком Q1 MOSFET. Також можуть бути





Тестові точки TP1-TP5 призначені для спостереження деяких внутрішніх сигналів PSoC MCU. Таблиця описує призначення кожної тестової точки.

Таблиця 3.2 Призначення тестових точок

Тестова точка	Призначення
TP1	Вихід конденсаторів низькочастотного фільтру LPF1
TP2	Вихід інструментального підсилювача генератора INA
TP3	Вихід смугового фільтру BPF
TP4	Вихід передпідсилювача приймача AMP; Вхід смугового фільтру BPF
TP5	Зарезервовано для майбутніх розширень

### 3.4 Внутрішня частина мікроконтролера

Внутрішні з'єднання мікроконтролера представлені на рис. 3.5. Позначення портів в дужках відображають відповідні номери портів. Курсив використовується для найменувань з'єднань, а тонкі лінії – для позначення сигналів синхронізації. Блоки, що не використовуються і можуть бути використані для реалізації додаткової функціональності приладу, позначені сірим кольором.



п'єзоелетричного передавача. Максимальний коефіцієнт відбору дорівнює 30, що є достатнім значенням. Вихід PGA підключений до входу фільтра зовнішнім з'єднанням тому, що обмеження щодо розміщення і розводці з'єднань мікроконтролера не дозволяють зробити це всередині мікроконтролера. Програмований підсилювач, розміщений в АСА01, сконфігурований як детектор переходу через нуль видаленням зворотнього зв'язку. Для додатків, які потребують точний аналіз спектру сигналу, який підвергається впливу ефекту Доплера, PGA може використовуватися безпосередньо видаленням реконфігурованої частини в вихідних кодах програмного забезпечення.

Змішувач скомбінований з конденсатором низкочастотного фільтра LPF1, який розміщено в блоках АСА10 і АСВ11. Можливість амплітудної модуляції блоку АСА10 використовується для змішування. Опорний сигнал змішувача береться від резонансного генератора через глобальну вихідну шину 4 (Global output bus 4). Вихідний сигнал фільтра заведений через внутрішній буфер на порт P0[5] для налагодження та тестування. Варто зазначити, що ширина фільтра LPF1 дорівнює 1200 Гц та максимальний коефіцієнт виборки складає приблизно 140 при гарному пригніченні результатів перетворення ультразвукового носія.

Вихідний сигнал фільтра LPF1 оцифровується 8-бітним сігма-дельта аналого-цифровим перетворювачем і подальше опрацювання виконується за допомогою програмного забезпечення. Вибір сігма-дельта аналого-цифрового перетворювача базується на низькому навантаженні на процесор та гарних характеристиках змінного струму. Частота дискретизації ADC1 складає 2,6 кГц. Для вимірювання рівня відбитого сигналу використовується 12-бітний накопичувальний аналого-цифровий перетворювач. Час перетворення даного АЦП є найбільшим серед інших типів перетворювачів для заданої тактової частоти, що дозволяє

ефективно пригнічувати небажану амплітудну модуляцію відбитого сигналу. В нашому випадку, частоту дискретизації перетворювача ADC2 складає приблизно 40 Гц.

Таймер, розміщений в блоці DBA03, задає швидкість передачі сигналу послідовному передавачу, який розміщений в блоці DCA06. Потік даних з ADC1 може бути переданий через COM порт до комп'ютера для аналізу або обробки при альтернативному застосуванні датчика.

### 3.5 Вбудоване програмне забезпечення датчика

Датчик безперервно аналізує сигнал на прояв ефекту Доплера і включає сигналізацію якщо значення цього сигналу в перевіряємій області частот більше певного порогового значення. Програма реалізована с використанням техніки головного циклу опрацьованого переривання. Збір та обробка даних в режимі реального часу виконується в підпрограмі обробки переривання від ADC1. Аналіз рівня відбитого сигналу та відправлення потоку даних від ADC1 виконується в головному циклі програми. Вихідний код програми дозволяє отримати дві версії програми – налаштувальну та кінцеву, в залежності від визначення значення змінної DEBUG. Налаштувальна версія програми надсилає відфільтрований потік даних від ADC1 через послідовний порт разом з іншою налаштувальною інформацією. В робочій версії ці можливості усунуті, що знижує витрати енергії та економить пам'ять програм.

Головний цикл доволі простий. Після збросу ініціалізуються периферійні компоненти і починається збір даних. Потім, вимірювач рівню ADC2 проводить вибірку з датчиків і обновлює статус світодіоду

низького рівня. В кінці перевіряється статус вибірки ADC1 та надсилається через послідовний порт (якщо увімкнено режим налаштування).

Алгоритм обробки даних реалізований в підпрограмі обробки переривання від ADC1. Спочатку проводиться низькочастотна фільтрація для усунення високочастотного шуму в сигналі. Потім, для покращення стійкості до завад, вихідний потік низькочастотного фільтру направляється до високочастотного фільтру для детектування сигналу тривоги. Сигнал тривоги подається тоді, коли детектується певна кількість циклів переривання за умовами спрацювання тривоги.

Цифрові фільтри виконані як фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою FIR (finite impulse response) із застосуванням блоку множинного акумулювання MAC (multiple-accumulation unit) PSoC MCU. Низькочастотний фільтр працює з частотою вибірки блоку ADC1 та має частоту відсікання близько 300 Гц. Довжина фільтру була обрана в 11 фільтруючих ланок. Високочастотний фільтр працює на  $\frac{1}{4}$  частоти дискретизації ADC та має частоту відсікання приблизно 20 Гц. Довжина фільтру складає 15 фільтруючих ланок для надійного функціонування як в приміщенні так і зовні, но може бути зменшена до 7 при роботі в менш зашумленому середовищі. В програмі є відповідна змінна умовної компіляції – BPF\_HIGH. Варто зазначити, що нижня частота вибірки блока FIR HPF була обрана такою, щоб забезпечити низьку частоту відсікання з невеликою кількістю фільтруючих ланок. Оскільки високочастотний фільтр працює на  $\frac{1}{4}$  частоти вибірки, структура опрацьовувача переривань була оптимізована для забезпечення балансу в споживанні ресурсів процесору.

Саме тому, що високочастотний фільтр оперує з низькими частотами вибірки, вихід LPF2 не потребує обробки при кожному перериванні.

Таким чином, при першому перериванні ми вираховуємо вибірку LPF2, потім опрацюємо цю вибірку цифровим HPF та виконуємо аналіз вихідного потоку HPF при третьому виклику підпрограми опрацювання переривань. Варто зазначити, що циклічний буфер LPF2 повинен постійно оновлюватися. Даний алгоритм ілюстровано на рис. 3.6.

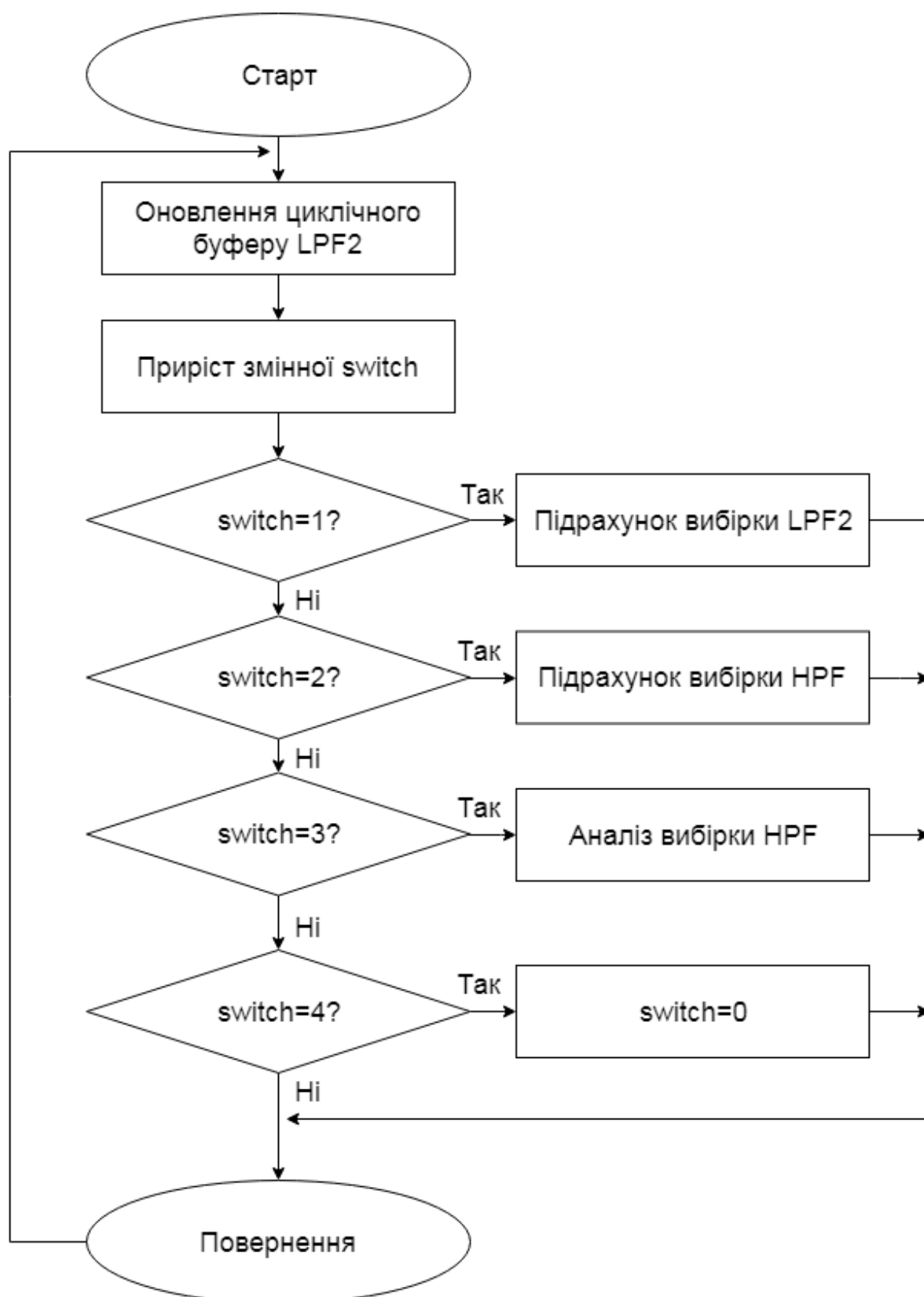


Рис. 3.6 Алгоритм роботи програмного забезпечення

Для детектування появи тривоги, застосований програмний детектор пікових станів. В якості альтернативи, можна реалізувати RMS детектор з використанням PSoC MAC. Між цими двома підходами суттєві відмінності в роботі не було спостережено.

Поточна версія програмного забезпечення датчика відносно проста. Вона займає лише 3К в пам'яті програм та 60 байт в пам'яті даних. Решта частина пам'яті програм і даних знаходиться в розпорядженні користувача і може бути використана для реалізації альтернативних методів використання датчика. Можливість динамічної реконфігурації PSoC MCU дозволяє у будь-який момент змінювати PSoC функції та використовувати задіяні ресурси для альтернативних цілей.

Поточна версія програми була написана на мові програмування «C» і працює на частоті 12 МГц. Будемо вважати, що оптимізація на рівні асемблера дозволить зменшити тактову частоту процесора в два рази і навіть більше раз для зменшення споживання енергії.

### 3.6 Варіанти розробки та альтернативне використання датчика

Запропоноване апаратне і програмне забезпечення датчика було оптимізовано для потреб систем безпеки. Для деяких типів таких систем отримані експлуатаційні характеристики можуть виявитися непридатними. Для досягнення великих робочих відстаней можна порекомендувати комбінувати зовнішній підсилювач потужності з малошумним передпідсилювачем. Стандартний драйвер MOSFET ідеально підходить для керування п'єзоелектричними датчиками тому, що він розрахований на керування високоємнісним навантаженням. Передпідсилювач посилює



нізькорівневі сигнали. Рис зображує запропоновану схему цього блоку. Запропонований підсилювач характеризується максимальним підсиленням на резонансній частоті п'єзоелектричного датчика, що дозволяє пригнічення шуму, який не потрапляє в досліджуваний частотний діапазон.

Далі опишемо варіанти резонансного генератора. В даному випадку був використаний внутрішній PSoC MCU тригер Шмідта для перетворення аналогового сигналу підсилювача в цифровий. В якості альтернативи пропонується варіант в якому сигнал з Comparator Bus 2 може бути заведений на Global Output Bus 5 через призначений для користувача модуль SPIS. Цей варіант був протестований, але при цьому спостерігалось збільшення споживання енергії та фазове тремтіння згенерованого сигналу. Можливості застосування датчика руху не обмежуються системами безпеки. Він може бути використаний для активації дитячих інтелектуальних іграшок, систем автоматичного відчинення дверей, систем ідентифікації, паркотроніки тощо. Також датчик може бути використаний для віддаленого безконтактного визначення швидкості та аналізу вібрації частин механізмів. Наприклад, датчик може бути вбудований в різне спортивне обладнання для контролю темпу тренування і оптимізації розподілу фізичних навантажень.

Для виміру швидкості можна використовувати ефект Доплера. Можна застосувати класичний метод підрахунку частоти/періоду, БПФ або техніку кореляції, вейвлітне перетворення тощо. Вейвлітне перетворення є оптимальним для аналізу нестационарних сигналів.

### Висновки до Розділу 3

У цьому розділі був розроблений власний ультразвуковий детектор руху, принцип роботи якого засновано на використанні ефекту Доплера. В основу цього приладу був покладений мікроконтролер PSoC. За допомогою PSoC Designer, PSoC Creator та програми, написаної на мові програмування C, яку було завантажено на мікроконтролер, ми отримали пристрій з наступними характеристиками: діапазон функціонування 5 см-4м, робоча частота 40 кГц та час реакції 0,25 мс. Споживання в звичайному режимі роботи складає 27 мА, а при активації сигналу тривоги 55 мА.

Даний пристрій також може бути дуже просто вдосконалений за рахунок додаткових блоків мікроконтролера, які можна використати для розширення функціоналу. Можливість перепрограмування мікроконтролера дозволяє знайти альтернативне використання для детектора руху, наприклад активація іншого електричного ланцюга при виявленні рухомого об'єкта замість сигналу тривоги.

## 4. РОЗРОБКА СТАРТ-АП ПРОЕКТУ

### 4.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Ультразвуковий детектор руху	1. В системах охорони та безпеки офісів і домівок.	Економічність, надійність, швидкий час спрацювання.
	2. Системи «розумного дому».	Економічність, високий ступінь кастомізації та налаштування, можливість розширення функціоналу за допомогою програмного забезпечення
	3. Паркотроніки та безпілотні системи в автомобілях.	Економічність, висока надійність, можливість виявлення перешкод з дзеркальними та прозорими поверхнями.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Проект	C18-90	MD module	XUM			
1.	Робоча частота	40 кГц	40 кГц	40 кГц	40-225 кГц		+	+
2.	Споживання енергії	27 мА-55мА	<50 мА	<50 мА	<50 мА		+	+
3.	Напруга живлення	5 В	15-30 В	7-12 В	24 В			+
4.	Час реакції	250 мс	500 мс	500 мс	<200			+
5.	Діапазон функціонування	5 см-4 м	1-4 м	0,1-5м	24-40 м		+	

#### 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Налаштування детектора руху	Програмування мікроконтролера	В наявності	Доступна
2.	Створення системи охорони чи автоматизації	Реалізація патерну проектування, який дозволить розширювати функціонал пристрою.	В наявності	Доступна

#### 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, <i>од</i>	5
2.	Загальний обсяг продаж, <i>грн/ум.од</i>	~ 500000 \$
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	~ 80%

Середня рентабельність близько 80%, ринок можна вважати прибутковим.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Безпека, комфорт	Системи охорони, системи автоматизації	Два типи клієнтів: корпоративні та приватні	Висока надійність, низька ціна

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Ринок є досить насиченим і покупці мають великий вибір	Вдосконалення технології, маркетинг, пошук тендерів
2.	Технічна підтримка	Потреба в високвалікованих агентах підтримки	Проведення навчання для нових співробітників

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Розробка нового товару з кращими властивостями, зниження цін	Удосконалення товару
2.	Попит	Обладнання систем охорони для компаній та організацій	Пошук корпоративних клієнтів, участь у тендерах

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції: чиста конкуренція	На ринку присутня велика кількість фірм, не існує фірми-лідера.	Зниження ціни на товар, покращення властивостей товару, маркетинг
Рівень конкурентної боротьби: світовий	Постачальники послуги конкурують на міжнародному рівні.	Налогодження експорту продукту за рахунок посередників

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Представлення додаткового (розширеного) функціоналу
За характером конкурентних переваг: цінова	Широко представлений низький ціновий сегмент	Наявність в асортименті моделей бюджетного сегменту
За інтенсивністю: не марочна	Не марочний характер боротьби	Відсутність брендів товарів у галузі



Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Ring	-	Кількість постачальників	Вимоги до якості (відтворюваність заявлених властивостей)	Замінники існують, проте технологічно не вигідні
Висновки:	Інтенсивність висока, бо товар є складним в виготовленні	-	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Продукт має бути якісним	Обмежень немає

Для здобуття конкурентоспроможності необхідно розробити лінію пристроїв з різними ціновими категоріями. Це дозволить охопити більшу аудиторію.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ціна	Ціна нижче за ціну конкурентів
2.	Терміни та масовість виробництва	Вчасні поставки продукту та зниження ціни
3.	Достатні робочі характеристики	Властивості виробу не гірші за властивості конкурентних виробів

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	али 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1		1	2	3
1.	Ціна	3					+		
2.	Терміни та масовість виробництва	5			-				
3.	Достатні робочі характеристики	0				+			

Таблиця 4.12 – SWOT – аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: гарні робочі характеристики, надійність	Слабкі сторони: ціна.
Можливості: зниження витрат на виробництво, покращення властивостей	Загрози: низька кількість якісних кадрів на ринку, поява конкурентів

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Відмежування у галузь автоматизації («розумні будинки»)	70 %	1-2 роки
2.	Розробка пристроїв бюджетного сегменту з нижчою надійністю	60 %	0,5 року

Обрано альтернативу № 1.

## 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Приватні особи (власники будинків)	Готові	Високий	Висока	Середня
2.	Корпоративні клієнти (компанії, організації з офісними та складськими приміщеннями)	Готові	Високий	Висока	Висока
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1 та №2.					

Таблиця 6.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Розробка версії приладу для бюджетного сегменту	Вибір дешевого аналогу зі схожими характеристиками	Досягнення достатніх характеристик для надійної роботи приладу	Стратегія лідерства на витратах
2.	Відмежування в сегмент автоматизації («розумні будинки»)	Розробка нового пристрою на основі оригінального детектора руху	Створення нового продукту	Стратегія диференціації

Обрано стратегію диференціації.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Обидва варіанти	Ні	Заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто спроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Якість	Лідерства на витратах	Висока якість	Оптимальне співвідношення ціна/якість, покращення існуючих характеристик.
2.	Точність	Лідерства на витратах	Висока точність	
3.	Ціна	Лідерства на витратах	Низька ціна	

## 4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Низька ціна	Найнижча ціна на ринку	Найнижча ціна на ринку
2.	Висока якість	Висока якість	Висока якість
3.	Низьке споживання енергії	Одні із найкращих властивостей	Низьке споживання енергії

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Ультразвуковий детектор руху		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Діапазон робочих частот	М	Вр
	2. Витрати енергії	М М	Тх Тл

	3. Джерело живлення		
	Якість: відповідає вимогам стандартів		
	Пакування: пристрій		
	Марка: «КМР»		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: договір, гарантія.		
	Після продажу: доставка, підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентні права.			

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	-	200 – 800\$	більше 5000\$	100 – 500\$

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
---	-----------------------------------	---	----------------------	--------------------------



	ЦІЛЬОВИХ КЛІЄНТІВ			
1.	Найкращі характеристики за найнижчу ціну	Налагодження контакту з клієнтами, надання достовірної інформації про характеристики	Канал першого рівня	Виробник збуває продукцію через посередників

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Вибір найкращого продукту	Прямі - канал комунікації,	Якість, низька кількість браку	Надання повної інформації про переваги виробу	Висока надійність та якість

## ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було проведено аналіз різних видів детекторів руху. Особливості кожного з них дозволяють підібрати оптимальний варіант відповідно до певних цілей та потреб. У цій роботі було прийнято рішення дослідити саме ультразвукові датчики руху, адже такі датчики є досить простими у використанні, екологічно чистими, недорогими, мають низький рівень споживання енергії та високий рівень чутливості.

У другому розділі було зосереджено увагу на принципі застосування саме ультразвуку для виявлення руху. Найбільш ефективним і поширеним методом є застосування ефекту Доплера, тобто виявлення зміни частоти відбитого сигналу від рухомого об'єкта. Такий аналіз частоти ультразвукових хвиль в комбінації з застосуванням частотних фільтрів дозволяє отримати пристрій з високою чутливістю, але й у той самий час мінімізувати кількість хибних тривог від таких факторів, як вітер, комахи, дрібні тварини.

У третьому розділі були поставлені певні задачі для вирішення яких було обрано розробити ультразвуковий детектор руху на основі мікроконтролера PSoC.

За допомогою PSoC Designer, PSoC Creator та програми, написаної на мові програмування C, яку було завантажено на мікроконтролер, ми отримали пристрій з наступними характеристиками: діапазон функціонування 5 см-4м, робоча частота 40 кГц та час реакції 0,25 мс. Споживання в звичайному режимі роботи складає 27 мА, а при активації сигналу тривоги 55 мА.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. online: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/Motion-Sensor-Market-614.html>
2. А.Е. Колесников. Ультразвуковые измерения. – 2-е изд, перераб и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 248 с., ил.
3. Датчики и методы повышения их точности: Учеб. пособие / А. В. Быценко, В. В. Яковенко, И. М. Сагайда, Я. Т. Луцик. -К. Выща шк., 1989. – 215 с.
4. Ультразвуковой датчик движения / В. Креминь // Электрон. компоненты и системы. – 2003. – № 4 (68)
5. Доплера эффект. ФИЗИКА. Большой энциклопедический словарь/ Гл. ред. А. М. Прохоров. – 4-е изд. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. – с. 183-184.
6. L.L. Beranek, “Acoustical measurements,” AIP, Woodbury, NY, (1988).
7. V. Magori, “Ultrasonic sensors in air,” IEEE Ultrasonic symposium, Proceedings, pp. 471-481 (1994)
8. D. Caicedo and A. Pandharipande, “Ultrasonic arrays for localized presence sensing”, IEEE Sensors Journal, pp. 849-858, May 2012.
9. online: <http://www.prowave.com.tw/pdf/T400ep14d.PDF>
10. D. Caicedo and A. Pandharipande, “Ultrasonic array sensor for indoor presence detection”, 20th European Signal Processing Conference, 2012. pp. 175-179.
11. A. M. Zungeru, “Design and development of ultrasonic notion detector”, School of Electrical and Electronic Engineering, 2016, 13 p.
12. Cypress Semiconductor Corporation, Programmable system on chip datasheet CY8C24633, 2014, 52 p.